

Estado del arte del proyecto: “Evaluación de problemas de calidad de energía y el factor de potencia en una industria con cargas eléctricas variables no lineales.”.

Autores: VLADIMIR SOUSA SANTOS - ANDRES ZAMBRANO MEJIA - ELIANA NORIEGA ANGARITA.

Resumen:

La presente propuesta de investigación evalúa los problemas de calidad de la energía y el factor de potencia que se presentan en una industria donde predominen cargas eléctricas variables no lineales. El proyecto se fundamenta en la necesidad de identificar y tomar las acciones respectivas, con el fin de mitigar los daños en los equipos eléctricos y pérdidas económicas que se presentan actualmente en un Taller de Soldadura, ubicado en el municipio de Galapa, Atlántico. Para realizar un estudio de los fenómenos que se desean evaluar, se requieren equipos de medición de alta precisión, muestreos en tiempos cortos que satisfagan los tiempos de respuesta requeridos ante los eventos analizados. Además se necesitan herramientas de análisis estadístico avanzado para hallar soluciones. Se iniciará la investigación con una revisión documental de los procedimientos y normas para la evaluación de problemas de calidad de la energía (Sousa Santos, V., & Gómez Sarduy, J., 2020) y el factor de potencia. Se identificarán las diferencias en el comportamiento de éstos fenómenos en los sistemas eléctricos con cargas eléctricas constantes y variables. Posteriormente, se establecerán los pasos del método propuesto para la caracterización de los problemas de calidad de la energía y el factor de potencia. El modelo será validado en un caso de estudio, se evaluarán los resultados obtenidos y se propondrán acciones de mejora a los problemas identificados.

Marco teórico:

Desde el año de 1980 el mundo ha mostrado un alto interés en el término “calidad de la energía” (Andrei et al., 2017). Pero ¿a qué se refiere este término? Existen diversas definiciones de la calidad de la energía dependiendo del autor; por ejemplo para la industria, la calidad de la energía se define como “Tener la confiabilidad de 99.98% en un sistema eléctrico de potencia”; para los productores de equipos se define como “conjunto de características de la fuente de potencia que permite que los equipos eléctricos trabajen apropiadamente” (Andrei et al., 2017), para la norma IEEE1159 (prácticas recomendadas para el control de la calidad de la energía eléctrica) (Committee et al., 2014) “variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan a la tensión y la corriente en un determinado y en una localización determinada en el sistema de energía”; para la norma IEC 61000-4-30, se define como “las características de la electricidad en un punto determinado del sistema eléctrico, evaluado frente a una serie de parámetros técnicos de referencia, para la literatura (Andrei et al., 2017) se define como “cualquier problema de potencia manifestado en la desviación de tensión, la corriente o la frecuencia, que resulta en una falla o mal funcionamiento de los equipos del cliente. En los inicios de la revolución industrial de la electricidad (a finales del siglo XIX), los países económicamente desarrollados se enfocaron en sacarle el mayor provecho para mejorar su calidad de vida mediante el uso de la energía eléctrica. Se comenzó con la iluminación de las calles, instalaciones eléctricas para las viviendas y se impulsó la mejora de las industrias. Se llegó a un momento en el que se tuvo tanta carga eléctrica que la capacidad de las redes locales se sobrecargaba, lo cual se convirtió en un gran problema (Roa, 2014) al frenar el desarrollo de los países. A raíz de la limitante de las redes eléctricas para suplir la demanda eléctrica de los usuarios, los países realizaron inversión para lograr mejorar el uso eficiente de la energía eléctrica, dando

como resultado una mejora en la electrónica de los dispositivos utilizados en la industria, las telecomunicaciones y el sector terciario. Los dispositivos electrónicos mejorados como los variadores de velocidad, hornos eléctricos, equipos de soldadura, computadores entre otros, lograron mejorar significativamente la velocidad, el control, la seguridad y las tareas complejas de muchos procesos permitiendo obtener un consumo de energía eléctrica significativamente menor en relación a los equipos anteriormente usado para llevar a cabo estas tareas. No obstante, estos dispositivos electrónicos tienen una alta sensibilidad a las perturbaciones eléctricas del sistema, por lo tanto se pueden averiar con facilidad (Metrel, 2017). Estos dispositivos electrónicos están compuestos principalmente por semiconductores, cuyo comportamiento eléctrico es variable produciendo perturbaciones en corriente y en tensión. Estos dispositivos son conocidos como cargas no lineales, los cuales afectan el funcionamiento de los dispositivos que usamos en la cotidianidad. A continuación se revisan las diferentes perturbaciones de calidad de energía y factor de potencia que se presentan en un sistema eléctrico de potencia: Las ondas eléctricas de los parámetros básicos de energía eléctrica como tensión y corriente pueden subir cambios en su frecuencia, amplitud y forma por perturbaciones electromagnéticas generadas por cargas no lineales. Dichos problemas que afectan la calidad de la energía eléctrica que este documento analiza son variados (Desbalance de tensión, hundimientos, flicker, transitorios, distorsión armónica y los también definidos en la tabla 1), donde y cada fenómeno de estos tiene diferentes causas y consecuencias así como también soluciones (Roa, 2014). Las perturbaciones se clasifican en: Larga duración o permanentes: Desequilibrio de tensión Flicker Interrupciones de larga duración (Duración ≥ 1 min) Armónicos de tensión Armónicos de corriente Muestras de tensión Variaciones de tensión de larga duración (subtensiones y sobretensiones) Interrupciones de corta duración (duración < 1 min) Lentas: Hundimientos o huecos de tensión (sags) Elevaciones de tensión (swell) Variaciones de frecuencia Rápidas: Sobretensiones transitorias

ANÁLISIS DE TENSIÓN

El comportamiento de la tensión se analiza de acuerdo a sus variaciones con respecto a la tensión nominal y al desequilibrio que se presente entre las tensiones de fase (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009). Variaciones de tensión de estado estable De acuerdo a (ICONTEC, 2008) Las variaciones de tensión en estado estable son aquellas desviaciones del valor R.M.S de la tensión en un intervalo de tiempo superior a un minuto, estas frecuentemente deben ser intervenidas por convertirse en una interrupción permanente; algunas causas comunes de estas variaciones son: - Caídas de tensión en transformadores y alimentadores. - Cambios de generación y carga. - Operación de los sistemas de apantallamiento. - Operación de protecciones eléctricas. - Algunas operaciones de conexión y desconexión Existen dos tipos de variaciones: Sobretensión Es el incremento de la tensión a un nivel superior al 110% del valor nominal por una duración mayor de un minuto estas sobretensiones son el resultado de la desconexión de grandes cargas o debido a la conexión de bancos de capacitores, considerando débil para mantener la regulación y control de tensión al sistema en el que se presenta esta condición. Subtensiones Es la variación por debajo del 90% del valor R.M.S. de la tensión por una duración mayor de un minuto. Al igual que en las sobretensiones las variaciones de baja tensión pueden ser causadas por conexiones de nuevas cargas y/o sobrecargas. En Colombia los límites para controlar las variaciones de tensión están definidos por la Resolución CREG 024 de 2005 entre +10% y -10% de la tensión nominal. Y se pueden monitorear con el registro del R.M.S. de la tensión contra el tiempo. Desequilibrio de tensión El desequilibrio de tensión, se pone de manifiesto cuando las tensiones de línea difieren en magnitud (Anwari & Hiendro, 2010). Entre las causas del desequilibrio de tensión se encuentra las fuentes de suministro inestable o desequilibradas, la desigual distribución de las cargas, la transposición incompleta de las líneas, transformadores conectados en bancos asimétricos, entre otros Balancear las fases de toda la instalación es la forma más efectiva de garantizar la corrección de los desbalances de tensión presentes en el sistema. Procurando desbalances menores al 2%. También

es importante monitorear el sistema para vigilar el correcto funcionamiento de los bancos de condensadores. De lo contrario los desbalances de tensión pueden provocar altas corrientes en motores, transformadores, barrajes y acometidas; las pérdidas eléctricas y fallas en la coordinación de protecciones también pueden ser afectadas (ICONTEC, 2008).

Parpadeos (Flickers) Los flickers son fácilmente previsible por las personas en los sistemas de iluminación como una emisión cambiante de la luz, es decir parpadeos de baja frecuencia en las luminarias. Este tipo de perturbaciones son variaciones bruscas y rápidas de tensión que también son comúnmente llamados fluctuaciones de tensión, caracterizados por cambios rápidos en el valor eficaz de tensión. Este tipo de perturbación es una de las que más afecta directamente a los seres humanos ya que estudios médicos han demostrado que el ojo humano es muy sensible a los parpadeos de luz y distinguiendo la máxima irritabilidad a frecuencias entre 6 y 10 Hz con un umbral de modulación de 0.25%; causando cansancio en la vista e irritabilidad en las pupilas por estar en continua dilatación y contracción ajustándose al nivel de iluminación, especialmente cuando se lee. La causa principal se debe a cargas grandes que manejan corrientes variables, esta condición hace que se presente modulación del voltaje en la barra de carga y en barras remotas (ICONTEC, 2008). Entre las fuentes de flickers están:

- Transitorios debidos a maniobras.
- Arranque de grandes motores.
- Trenes de laminación (proceso de laminación).
- Trituradores para procesos mineros.
- Generación eólica distribuida
- Generación distribuida
- Soldadores eléctricos. (Máquinas de soldadura)
- Hornos de inducción (0.5 a 30 Hz)

Interrupciones de larga duración (Duración ≥ 1 min) Una interrupción de larga duración sucede cuando hay ausencia de tensión por periodos de tiempo superiores a 1 minuto, además es una condición en la cual la tensión es inferior al 10% de la tensión nominal (Sagastume Gutiérrez, A., & Cogollos Martínez, J., 2019). Se clasifican en programadas y accidentales, estas últimas son fallas primarias es decir que no son controladas. Como por ejemplo accidentes, ambientales, fallas humanas.

Armónicos eléctricos Los armónicos por su parte, constituyen tensiones o corrientes sinusoidales, cuyas frecuencias son un múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema de suministro eléctrico (IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems IEEE Power and Energy Society, 2014). Este fenómeno es resultado de la distorsión de la forma de onda, provocado por dispositivos y cargas con características no lineales, que son conectados al sistema de potencia. Entre estas cargas no lineales se encuentran los convertidores estáticos de potencia, los dispositivos de descargas en forma de arcos eléctricos, los dispositivos magnéticos saturados y en menor medida, las máquinas rotatorias (IEEE, 1993). Los componentes de un sistema de potencia como los transformadores (Bishop et al., 1996; Digalovski et al., 2013), los cables (IEEE, 1993), los capacitores (C. Boonseng et al., 2001; Chongrag Boonseng et al., 2020), los equipos electrónicos (IEEE, 1993), los metrocontadores (Milankov & Radic, 2014), los desconectivos (Elmore et al., 1993; Fuller & Roesler, 1988) y los motores (Ching-Yin Lee & Wei-Jen Lee, 1999), (Santos et al., 2015), son afectados en mayor o menor medida por la presencia de armónicos. La presencia de armónicos en la red genera problemas en el sistema eléctrico, estos efectos dañinos se señalan a continuación (ICONTEC, 2008):

- Interferencia en el rango de audiofrecuencias con señales de control y líneas de energía. Los armónicos de tensión pueden provocar disturbios en los sistemas electrónicos. Por ejemplo, afectan el normal desempeño de los tiristores.
- Corrientes armónicas en motores de inducción, transformadores y claves que causan pérdidas adicionales de energía y calentamiento. Estos efectos son, en su mayor parte, atribuibles a armónicas de orden menor y altas magnitudes de amplitud.
- Inestabilidad dieléctrica de cables aislados como resultado de sobretensiones del sistema.
- Interferencia inductiva con los sistemas de comunicación, que resulta del acoplamiento inductivo entre las frecuencias armónicas y las líneas de comunicación.
- Errores en los equipos de medición, debido a que generalmente los diseños consideran señales sinodales puras.
- Provocan la disminución del factor de potencia.

Distorsión armónica individual: Los contenidos o tasas de los

diferentes armónicos de tensión que constituyen una onda deformada se expresan en forma de porcentaje respecto de la componente fundamental, de acuerdo con la siguiente relación (Roa, 2014): En esta expresión, V_n es la amplitud del armónico de tensión de orden n y V_1 la amplitud de la componente fundamental de la onda de tensión. $IHD_n = v_n/v_1 \times 100\%$ (tensión y corriente) En esta expresión, V_n es la amplitud del armónico de tensión de orden n y V_1 la amplitud de la componente fundamental de la onda de tensión. Distorsión armónica total (Tensión y corriente) El nivel de distorsión armónica se describe por el espectro total armónico mediante las magnitudes y el ángulo de fase de cada componente individual. Es común, además, utilizar un criterio denominado distorsión total armónica (THD) como una medida de la distorsión (Harper, 2004). $THD V = \sqrt{2(V_3^2 + V_5^2 + V_7^2 + \dots)} / V_1$ (Tensión) $THD i = \sqrt{2(I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots)} / I_1$ (Corriente) Distorsión demanda total (TDD) Es la relación entre la corriente armónica total y la demanda máxima de la corriente de carga (Harper, 2004). $TDD = \sqrt{2(I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots)} / I_{(Demanda\ max)}$ (Corriente) La distorsión total de demanda, TDD, refleja la importancia de las distorsiones armónicas de corriente respecto a la carga máxima del sistema medido, ya que podrían presentarse altas distorsiones de corriente, es decir, una medida de THDi elevada, con bajos niveles de carga, que no afectarían en igual proporción al sistema (ICONTEC, 2008).

Muestras de tensión Las muestras son perturbaciones periódicas en la forma de onda de voltaje del sistema con duración menor a medio ciclo, son causadas por la operación normal de cargas no líneas y elementos electrónicos para alta potencia cuando la corriente es conmutada de una fase a otra, como ocurren continuamente, son caracterizadas por el espectro armónico de la tensión afectada y son tratadas como un caso poco usual en los sistemas eléctricos por su dificultad para ser detectadas (Harper, 2004). Las muestras de tensión causan fallas en sistemas de regulación y fallas en el funcionamiento de algunos equipos electrónicos. Y su mitigación implica el aislamiento, de los equipos sensibles, de la fuente que las está produciendo. Utilizar más cargas inductivas como motores también sirve como solución para eliminar este tipo de perturbación (Harper, 2004).

Perturbaciones lentas Interrupciones de corta duración (duración $< 1\text{min}$) Una interrupción de corta duración sucede cuando hay ausencia de tensión por periodos de tiempo no superiores a 1 minuto, además puede catalogar una interrupción corta cuando no disminuye por más del 10% de la tensión nominal. La duración de la falla depende de la capacidad de reacción y de re cierre de la protección, puesto que por lo general las protecciones de reclosing tienen un tiempo inferior a 1 minuto o 30 ciclos. Es por esta razón que las fallas en el dispositivo de protección causan o determinan el tipo de perturbación de momentánea a permanente (Harper, 2004).

Hundimiento o huecos de tensión (sags) Los sags se relacionan los problemas de calidad de energía y son generalmente el resultado de fallas en el sistema de alimentación y de conmutación acciones para aislar las secciones con fallas. Se caracterizan por las variaciones del margen de tensión fuera del rango normal de funcionamiento de las tensiones. Un hueco de tensión tiene una corta duración (típicamente de 0,5 a 30 ciclos o 1 minuto) la reducción en el voltaje rms causada generalmente por una falla lejana en alguna parte del sistema de potencia. Las reducciones en los sags están entre el 90% y el 10% el valor eficaz de la tensión. Elevaciones de tensión (swell) Cuando el valor nominal eficaz de tensión sube por encima del 110% de la tensión declarada con una duración entre 0,5 ciclos (8,33 milisegundos) y 30 ciclos (1 minuto), a esta perturbación se le conoce con el nombre de elevaciones de tensión (SWELLS) o también llamadas en algunas publicaciones sobretensiones momentáneas. Estas elevaciones se producen generalmente por fallas en sistema eléctrico, donde las fallas monofásicas son las más comunes provocando una subida temporal tensión en las fases no involucradas en la falla pero es poco probable que se de en la misma magnitud cerca de la subestación y en la subestación misma, además de la conexión delta-estrella del transformador de la subestación que provee el camino de baja impedancia para las corrientes de secuencia a tierra más la puesta a tierra misma de la subestación. Otras causas son desconexión o cambios de grandes cargas, conexión de grandes

bancos de condensadores, resonancias y ocurrencia de fenómenos de descargas atmosféricas naturales. El valor de la elevación de tensión es proporcional a la distancia a donde ocurre la falla, el valor de impedancia y la capacidad de la puesta a tierra del sistema de alimentación. La consecuencia más relevante de las elevaciones de tensión es la pérdida de vida útil de los equipos conectados al sistema, así como desgaste del aislamiento eléctrico en máquinas rotativas y estáticas. También se presentan operaciones indeseadas en relés de protección e incremento en la potencia de salida en banco de condensadores. Variaciones de frecuencia La frecuencia eléctrica es un parámetro eléctrico fundamental en los sistemas de potencia de corriente alterna, físicamente designa el número de veces que se repite un fenómeno por unidad de tiempo. Para los sistemas ondulatorios en presencia de ondas electromagnéticas, la frecuencia expresa el número de ciclos que se repite dicha onda por segundo y siendo su unidad de medida en el sistema internacional (SI) el hercios (Hz). Este parámetro es fijo en cada sistema eléctrico de potencia; en Colombia la frecuencia de operación del sistema eléctrico es de 60 Hz mientras que para Brasil y la mayoría de los países europeos es de 50 Hz. La variación o distorsión en el valor de la frecuencia produce problemas en las redes y más que todo en los equipos electrónicos asociados a ellas, siendo estos muy sensibles a las variaciones fuertes en la frecuencia; produciendo un inadecuado funcionamiento de estos equipos. También producen errores de sincronización en usuarios con grandes cargas de rectificadores e interrupción de servicio y variaciones de tensión por deslastre de carga. La variación de la frecuencia se debe principalmente a una modificación del equilibrio entre el generador y la carga, ya que la frecuencia está relacionada con a los RPM de las maquinas rotativas, en este caso generadores de energía eléctrica. También se puede atribuir estas variaciones a la carga del sistema, es decir cuando la carga supera la capacidad de generación, suelen presentarse disminuciones de la frecuencia. Los incrementos bruscos y repentinos de cargas también pueden modificar la frecuencia por cambios de velocidad síncrona. Los efectos de estas variaciones en las cargas a parte del cambio de la velocidad de giro de las maquina rotativas son: - Los equipos electrónicos alteran su funcionamiento. - Los motores pierden potencia. - Los motores, turbinas y generadores sufren altas vibraciones mecánica. Perturbaciones rápidas Transitorias Estas perturbaciones son generadas por impulsos de voltaje de alta velocidad superpuestos sobre la onda sinusoidal de energía eléctrica, los tiempos de duración son muy rápidos (microsegundos) y los cambios en la tensión y corriente son muy altos, lo que pude ocasionar daños en equipos sensibles y electrónicos. Estos cambios bruscos del sistema son ocasionados comúnmente por descargas atmosféricas y sistemas de refrigeración.

14.1.1 Sobretensiones transitorias Son cambios bruscos en el valor instantáneo de la amplitud de la tensión, es decir que pueden llevar a valores superiores al valor nominal de esta. La duración fluctúa entre los microsegundos.

14.1.2 Sobretensiones impulsivas Son aquellas perturbaciones unidireccionales causadas por descargas eléctricas, estas poseen una mayor magnitud pero baja energía. Se caracteriza por su tiempo de elevación y decaimiento lo que pueden ser dados a conocer por el contenido espectral transitorio.

14.1.3 Sobretensiones oscilatorias Las sobretensiones oscilatorias consisten en un cambio muy rápido de polaridad del valor instantáneo de voltaje, estas sobretensiones son originadas por malas conexiones, desconexiones fuertes y otros. En general las sobretensiones transitorias pueden afectar a todos los elementos del sistema eléctrico, dependiendo de la magnitud de la sobretensión.

Estado del arte:

En (Monzón, 2013) se publica un estudio de la calidad de la energía del suministro eléctrico en una industria del sector aeronáutico en España, en la cual se diseñan y construyen las piezas para el ensamble de aviones. La fabricación se realiza mediante motores, máquinas de soldar y mesas de corte. Estos equipos han sufrido daños de las piezas, pérdidas de información y desconfiguración,

debido a la aparición de huecos de tensión. En el trabajo se proponen tres soluciones: un volante de inercia, un sistema de baterías (UPS) y un restaurador dinámico de tensión (DVR). Finalmente se evalúan las soluciones teniendo en cuenta si se protege toda la planta o los equipos críticos. En (SECOVI, 2006) se muestra un estudio de calidad de la energía que realiza en una planta de fabricación de piezas de vehículos motorizados, ubicada en México. Se realiza un análisis del sistema eléctrico de potencia de la planta de fabricación, hallando problemas de fluctuaciones de tensión y corrientes armónicas. En este trabajo se propone la instalación de supresores de transitorios para tableros críticos, banco de condensadores automático y un acondicionador de voltaje. En (Jiménez, 2015) se presenta un estudio de calidad de la energía y el factor de potencia en la hidroeléctrica caldas, Colombia. En esta tesis se propone una guía metodológica que permita evaluar la severidad de hundimientos de tensión que afectan el suministro eléctrico en tres sectores: subestación, sector comercial y sector industrial. Se concluye que la regulación de país requiere mayor profundización para la evaluación completa de estos fenómenos. Se elabora la metodología y se aplican en los casos de estudio mencionados. En (Churio Silvera et al., 2018) se realiza un estudio de calidad de la energía y el factor de potencia en un campus universitario de la costa caribe colombiana. En este trabajo se realiza un diagnóstico de las instalaciones eléctricas existentes y posteriormente se conecta un equipo de medición para evaluar las variables eléctricas. Se concluye que los niveles de distorsión armónica en tensión y corriente se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma, sin embargo se encontró un factor de potencia por fuera de los límites permitidos.

Bibliografía:

Andrei, H., Andrei, P. C., Constantinescu, L. M., Beloiu, R., Cazacu, E., & Stanculescu, M. (2017). Electrical power systems. In Power Systems. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51118-4_1

Anwari, M., & Hiendro, A. (2010). New unbalance factor for estimating performance of a three-phase induction motor with under-and overvoltage unbalance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(3), 619–625. <https://doi.org/10.1109/TEC.2010.2051548>

Bishop, M. T., Baranowski, J. F., Heath, D., & Benna, S. J. (1996). Evaluating harmonic-induced transformer heating. *IEEE Transactions on Power Delivery*. <https://doi.org/10.1109/61.484029>

Boonseng, C., Chompoo-inwai, C., Kinnares, V., Nakawiwat, K., & Apiratikul, P. (2001). Failure analysis of dielectric of low voltage power capacitors due to related harmonic resonance effects. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*. <https://doi.org/10.1109/pesw.2001.917205>

Boonseng, Chongrag, Boonseng, R., Boonsaner, N., Kinnares, V., Apiratikul, P., & Kularbphettong, K. (2020). Partial Discharge Phenomena in Power Capacitor Unit Insulation Under Harmonic Resonance Effects. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31676-1_51

Ching-Yin Lee, & Wei-Jen Lee. (1999). Effects of nonsinusoidal voltage on the operation performance of a three-phase induction motor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14(2), 193–201. <https://doi.org/10.1109/60.766983>

Churio Silvera, O., Vanegas Chamorro, M., & Valencia Ochoa, G. (2018). Estudio y diagnóstico de la calidad de la energía de un campus universitario en la costa norte de Colombia. *AVANCES: Investigación En Ingeniería*, 15(1), 271–285. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.4739>

Committee, D., Power, I., & Society, E. (2014). IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), 2014, 1–29. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459>

Digalovski, M., Najdenkoski, K., & Rafajlovski, G. (2013). Impact of current high order harmonic to core losses of three-phase distribution transformer. IEEE EuroCon 2013. <https://doi.org/10.1109/EUROCON.2013.6625181>

Elmore, W. A., Kramer, C. A., & Zocholl, S. E. (1993). Effect of Waveform Distortion on Protective Relays. IEEE Transactions on Industry Applications. <https://doi.org/10.1109/28.216551>

Fuller, J. F., & Roesler, D. J. (1988). Influence of harmonics on power distribution system protection. IEEE Transactions on Power Delivery. <https://doi.org/10.1109/61.4292>

Harper, G. E. (2004). El abc de la calidad de la energía eléctrica (Limusa).

ICONTEC. (2008). Norma Tecnica Colombiana NTC 5001- Calidad de la Potencia Electrica.pdf.

IEEE. (1993). IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. In IEEE Std 519-1992 (Vol. 1992, Issue June). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1993.114370>

IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems IEEE Power and Energy Society, 2014 ANSI/IEEE Std. 519 5 (2014). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459>

Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2009). IEEE Std 1159 - IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. In IEEE Std 1159-2009 (Revision of IEEE Std 1159-1995) (Vol. 2009, Issue June). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2009.5154067>

Jiménez, A. F. S. (2015). Guía metodológica para el análisis de hundimientos de tensión en el sistema de distribución de la CHEC.

Metrel, 2017. (2017). Calidad de la energía Análisis de potencia , armónicos y perturbaciones de red en sistemas trifásicos de distribución (5 edición, Issue 20). <https://doi.org/20750958>

Milankov, R., & Radic, M. (2014). Harmonics: Examples of negative impacts. 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 435–438. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2014.6842817>

Monzón, M. (2013). Calidad De Suministro Eléctrico: Huecos De Tensión. Mitigación De Sus Efectos En Las Plantas Industriales. 18–51.

Roa, O. M. C. (2014). METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN BASE A NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES PARA LA UNIVERSIDAD DE LA COSTA - CUC. In LEI No

16.050, DE 31 DE JULHO DE 2014 - Política de Desenvolvimento Urbano e o Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo (Issue 1). <https://doi.org/10.4324/9781315853178>

Rönnberg, S., & Bollen, M. (2016). Power quality issues in the electric power system of the future. In *Electricity Journal* (Vol. 29, Issue 10). <https://doi.org/10.1016/j.tej.2016.11.006>

Sagastume Gutiérrez, A., & Cogollos Martínez, J. (2019). Balance de energía y exergía de un horno de cuba vertical para la producción de cal. *IJMSOR: International Journal of Management Science & Operation Research*, 4(1). <https://doi.org/10.17981/ijmsor.04.01.09>

Santos, V. S., Felipe, P. R. V., Sarduy, J. R. G., Lemozy, N. A., Jurado, A., & Quispe, E. C. (2015). Procedure for determining induction motor efficiency working under distorted grid voltages. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30(1). <https://doi.org/10.1109/TEC.2014.2335994>

SECOVI. (2006). Estudio de Calidad de Energía ® SECOVI.

Sousa Santos, V., & Gómez Sarduy, J. (2020). Análisis de Calidad de la Energía y Estado de Carga en un Puesto de Seccionamiento y Transformación de Energía. *IJMSOR: International Journal of Management Science & Operation Research*, 4(1). <https://doi.org/10.17981/ijmsor.04.01.08>